

文章编号:1007-2780(2018)01-0067-07

月基极紫外相机软件系统的设计与实现

于涛¹,方新²,荀显超³

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 空军参谋部,北京 100843; 3. 空军航空大学 航空基础学院基础部,吉林 长春 130000)

摘要:为了保证月基极紫外相机圆满完成工程任务,实现对地球周围等离子体层的观测研究,设计并实现了极紫外相机软件系统。首先,介绍了软件系统的构成及工作原理;其次,对软件系统的关键模块及工作模式进行详细设计;最后,对极紫外相机在月球表面长期探测的结果进行详细分析。探测结果表明:软件系统实现了精准的对地跟踪,误差 $\leq 0.1^\circ$,高压控制到2 850 V时获得了高质量的图像数据,各功能及工作模式执行正确,各项性能测试结果满足极紫外相机技术指标要求,为极紫外相机在月球取得圆满成功的结果起到了重要作用。

关键词:极紫外相机;软件系统;等离子体层

中图分类号:V443+.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183301.0067

Design and implement of extreme ultraviolet camera software system

YU Tao¹, FANG Xin², XUN Xian-chao³

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.Air Force Staff of the People's Liberation Army, Beijing 100843, China;

3.Basic Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to ensure that the lunar based extreme ultraviolet camera can finish the engineering task satisfactorily, monitor and research the earth plasmasphere, the software system was designed and implemented. Firstly, the structure and the operating principle of software system were introduced. Then, the key modules and work mode of software system were designed in detail. Finally, the long-term exploration results of extreme ultraviolet camera based on lunar were analyzed in detail. The exploration results indicated that software system could control the extreme ultraviolet camera to track the earth exactly and the control error of tracking mechanism was no larger than 0.1° . In addition, the lunar based extreme ultraviolet camera obtained high quality images when the high-voltage power supplied output 2 850 V and finished all functions and implement the work mode correctly. The performance test results satisfied the requirements of extreme ultraviolet camera technical indexes. The software system plays an important role for extreme ultraviolet camera on-lunar operation.

Key words: extreme ultraviolet camera; software system; plasmasphere

收稿日期:2017-08-09;修订日期:2017-09-26.

基金项目:国家自然科学基金(No.61108066)

Supported by National Nature Foundation of China(No.61108066)

* 通信联系人, E-mail: yut@ciomp.ac.cn

月基极紫外相机软件系统的工作原理:系统工作过程中,系统控制处理器根据接收到的控制命令和参数进行运动机构和高压电源的控制、图像数据的采集、工作模式的运行与转换;系统控制处理器通过数据总线和地址总线与逻辑控制处理器进行信息传递,发送运动机构、高压电源、图像数据采集的控制命令和参数,接收运动机构、高压电源的工作状态和图像数据;采用霍尔传感器作为运动机构的定位器,系统控制处理器根据霍尔传感器反馈的霍尔状态确定运动机构位置,实现方位、俯仰、开关盖机构的控制;逻辑控制处理器根据相关命令及参数,按设计要求产生电机时序控制信号、高压电源控制信号,采集并处理探测器接收的图像信号;采用步进电机作为运动机构的驱动元件,驱动方位、俯仰、开关盖机构运动到目标位置。

3 软件系统设计

月基极紫外相机的软件系统主要功能包括:运动控制机构控制、电机控制、高压电源控制、图像数据采集和处理、以及工作模式控制。通过控制电机,实现方位和俯仰机构位置的调整,指向地球,控制开关盖机构处于打开状态;然后控制高压电源上电,直到输出适合探测器工作的电压;对探测器采集的图像数据进行处理;根据相机的任务执行流程,完成工作模式控制。

3.1 运动机构控制

极紫外相机的运动机构包括 3 部分:方位机构、俯仰机构和开关盖机构。方位和俯仰机构是极紫外相机的二维跟踪机构,以补偿着陆器的倾斜及地、月轨道间的角度变化。开关盖机构是极紫外相机的保护机构,防止着陆时月尘进入相机内部;月昼工作时用于遮挡阳光,避免阳光对探测器的干扰。

根据极紫外相机的技术指标要求,方位机构调整范围为 $100^{\circ} \sim 150^{\circ}$,调整误差 $\leq 0.1^{\circ}$;俯仰机构调整范围为 $15^{\circ} \sim 90^{\circ}$,调整误差 $\leq 0.1^{\circ}$;开关盖机构调整范围为 $0^{\circ} \sim 115^{\circ}$,调整误差 $\leq 0.1^{\circ}$ 。

系统采用步进电机作为运动机构的驱动元件,电机驱动减速机构带动方位、俯仰、开关盖机

构运行。方位电机与机构转动速比为 $80:1$,俯仰电机与机构转动速比为 $90:1$,开关盖电机与机构转动速比为 $50:1$ 。

霍尔传感器以自身体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等特点,已经在航空航天领域得到广泛应用,成为定位运动机构位置的重要元件,本系统采用霍尔传感器作为跟踪机构的定位器。

霍尔传感器的安装方式:在运动机构调整范围内的两端各放置一个霍尔传感器,使两个霍尔传感器的有效范围不叠加,即运动机构在调整范围内,中间部分两个霍尔传感器都无效,两端只有一个霍尔传感器有效。

霍尔传感器与运动机构位置的标定目的:在运动机构调整范围内,确定霍尔传感器有效的起始信号与运动机构位置的对应关系。

为了霍尔传感器的精准定位和运动机构控制的可靠性,当运动机构从霍尔传感器无效位置运动到有效位置时,控制运动机构停止运动。

系统控制处理器根据运动机构调整角度和霍尔传感器标定位置对运动机构进行控制,系统控制处理器选用 ATMEL 公司的型号为 AT697F 的 CPU,控制算法如图 2 所示。

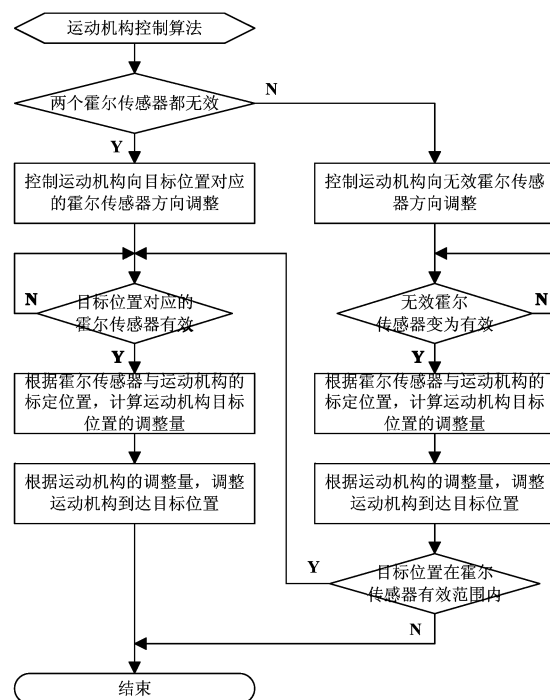


图 2 运动机构控制算法

Fig.2 Control algorithm of active machine

3.2 电机控制

通过逻辑控制处理器对步进电机进行控制, 步进电机驱动脉冲频率为 200 Hz, 控制方式为四相八拍, 驱动时序图如图 3 所示^[9], 其中图(a)为电机正转时的时序, 各相的通电顺序为 A→AB→B→BC→C→CD→D→DA, 图(b)为电机反转时的

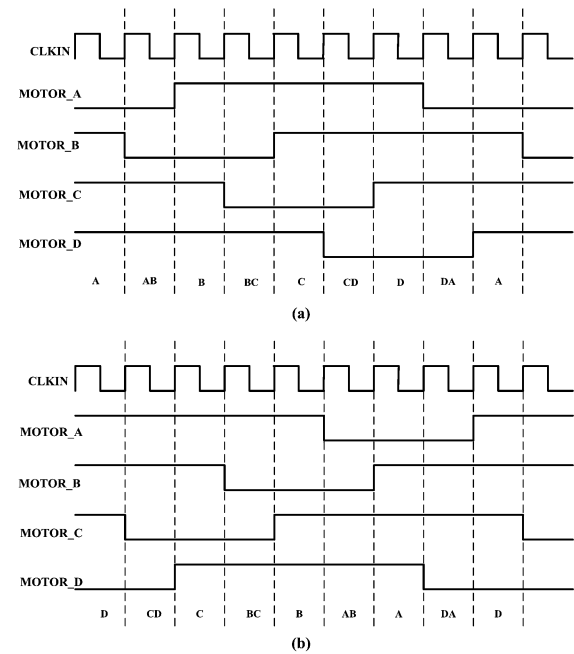


图 3 步进电机控制时序图
Fig.3 Sequence diagram of stepper motor

时序, 各相的通电顺序为 D→DC→C→CB→B→BA→A→AD。逻辑控制处理器对步进电机进行控制的过程中, 如果霍尔传感器从无效变为有效时, 逻辑控制处理器停止电机驱动脉冲信号的输出, 跟踪机构停止运动。逻辑控制处理器选用 Xilinx 公司的型号为 XC2V3000-4FG676C 的 FPGA。

3.3 高压电源控制

空间的极紫外辐射强度通常很弱, 甚至呈现单光子状态, 微通道板光子计数成像探测器则可以通过位敏阳极和电子读出电路, 利用位敏探测和单光子计数技术来实现极微弱光辐射的成像探测^[1]。由于微通道板只有在高电压、高真空条件下才能工作, 因此需要对高压电源进行控制, 输出适应微通道板工作的有效电压。

高压电源由逻辑控制处理器控制, 逻辑控制处理器接收到系统控制处理器发送的高压上下电命令和电压目标值, 以每 10 s 增加或减少 100 V 的步进速度对高压电源进行上下电控制。

3.4 图像数据采集和处理

月基极紫外相机的图像数据是楔条形阳极收集电子后, 输出 3 路电荷信号, 经放大、整形、峰值保持以及 A/D 转换后生成, 每一个 12 位的数据代表前述 3 路电荷的电压值, 分别用 S、W、Z 表示。根据阳极的位置解码算法可以获得电子云的质心位置的坐标数据, 公式为^[10]:

$$\begin{cases} X = N \cdot K \cdot (a_1 \frac{S}{S+W+Z} + b_1 \frac{W}{S+W+Z} + c_1) - x_0 \\ Y = N \cdot K \cdot (a_2 \frac{W}{S+W+Z} + b_2 \frac{S}{S+W+Z} + c_2) - y_0. \end{cases} \quad (1)$$

在公式(1)中 N 为一维像元数, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 为校正系数, K 为放大系数, x_0 、 y_0 为中心化坐标。

表 1 所示, 依据定标试验结果, 月球表面极紫外相机根据探测器温度选择校正系数。

表 1 校正系数
Tab.1 Emendation coefficient

温度/℃	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	x_0	y_0
50 ~ 75	1.043	-0.015	-0.005	1.162	0.045	-0.035	15	106
16 ~ 49	1.039	-0.017	-0.004	1.138	0.033	-0.029	0	100
-25 ~ 15	1.044	-0.014	-0.005	1.118	0.023	-0.023	0	75

逻辑控制处理器通过数据总线和地址总线将原始数据 S 、 W 、 Z 和坐标数据 X 、 Y 发送给系统控制处理器,系统控制处理器负责存储和下传。

3.5 工作模式控制

月基极紫外相机控制命令和参数以数据注入指令的形式从地面发出,经中继星发送到月球,数据注入指令经解析得到各个功能模式的控制命令和参数。

根据极紫外相机的任务需求,探测模式有两种:原始探测和坐标探测。两种探测模式都采用连续探测的模式,即根据预定的帧曝光时间,连续采集图像数据。

原始探测的第一帧图像不需要计算坐标数据 X 、 Y ,直接将原始数据 S 、 W 、 Z 下传,考虑图像数据存储和下载资源限制,从第二帧开始,采用坐标探测;坐标探测需要根据原始数据 S 、 W 、 Z 计算坐标数据 X 、 Y ,只下传坐标数据。

根据极紫外相机的时序控制要求,各个功能模式需要具有预定的执行顺序和流程,工作模式控制流程见图4所示。

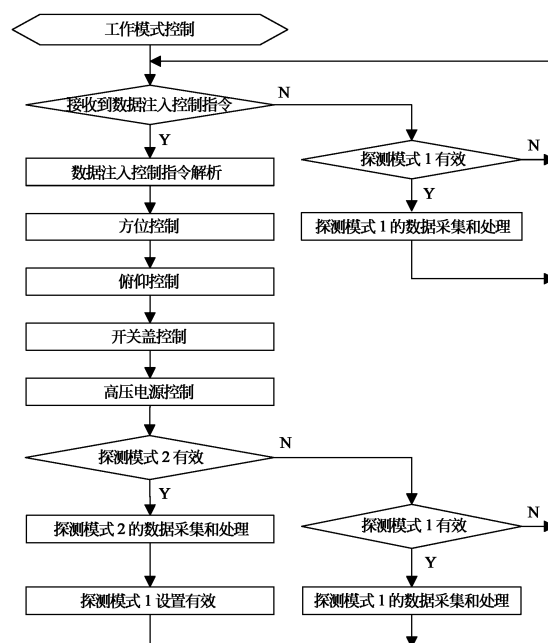


图4 工作模式时序图

Fig.4 Sequence diagram of work mode

4 月球表面工作验证

表2所示,极紫外相机在月球表面的运动机构的控制结果表明,运动机构控制误差 $\leq 0.1^\circ$,满足极紫外相机的技术指标要求。

表2 运动机构的控制结果

Tab.2 Control results of active machine

时间	运动机构	目标位置	控制结果	误差
2013-12-15 16:45:00.235	开关盖	115°	114.95°	0.05°
2014-7-16 22:15:41.593	方位	147.2°	147.17°	0.03°
2014-7-16 22:16:10.634	俯仰	38.2°	38.25°	0.05°
2014-7-16 23:10:25.663	俯仰	28.2°	28.24°	0.04°
2014-7-16 23:21:13.669	俯仰	38.2°	38.16°	0.04°
2014-7-17 00:13:40.698	方位	187.2°	187.15°	0.05°
2014-7-17 00:14:17.658	俯仰	79.7°	79.66°	0.04°
2014-7-17 20:33:24.375	开关盖	0°	0.03°	0.03°

图5为2013年12月25日00:41极紫外相机在月球表面的观测图像,杂光信号很小,信噪比较高,高压电源控制到2850V,(a)为原始图像,地球位于探测器成像的中间位置,通过杂光去除

得到(b),能准确判定地球轮廓、地球阴影、电离层气辉轮廓、地球等离子体层范围、地球等离子体层顶位置等,结果表明高压控制、图像采集和处理正确,跟踪机构能够实现精准的对地指向。

极紫外相机在月球表面工作数月时间,通过对极紫外相机工程参数和遥测参数的仔细判读,

极紫外相机完全按照预定工作模式工作,表明软件系统运行正常。

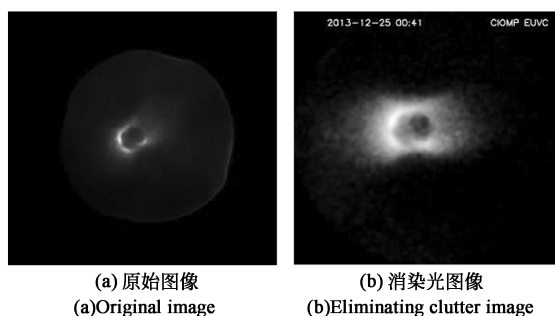


图 5 月基极紫外图像
Fig.5 Lunar based image

5 结 论

根据月基极紫外相机的任务需求,设计并研制了极紫外相机软件系统,经过月球表面长时间工作考核,极紫外相机软件系统实现了精准的对地跟踪,获取了高质量的图像数据,各功能模式及工作模式执行正确,各项性能测试结果满足极紫外相机技术指标要求,为保证月基极紫外相机圆满完成科学观测任务起到了关键作用。

参 考 文 献:

- [1] 尼启良,卜绍芳,刘世界,等.微通道板光子计数成像探测器预处理实验研究[J].光子学报,2012,41(6):658-663.
NI Q L, BU S F, LIU S J, *et al.* Preconditioning experiment research of microchannel plate photon counting imaging detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 658-663. (in Chinese)
- [2] 王智,王忠素.月基极紫外相机反射镜与探测器间支撑结构[J].仪器仪表学报,2013,34(1):57-64.
WANG Z, WANG Z S. Supporting structure between reflection mirror and detector in lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(1): 57-64. (in Chinese)
- [3] 严伟,任鑫,刘建军,等.嫦娥三号极紫外相机几何定位方法及其应用[J].光子学报,2016,45(7):0704002.
YAN W, REN X, LIU J J, *et al.* The application of geometric positioning for Chang'E-3 moon-based extreme ultraviolet camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0704002. (in Chinese)
- [4] 李朝辉,王忠素,胡庆龙,等.月基极紫外相机跟踪转台设计与刚度分析[J].仪器仪表学报,2013,34(11):2535-2541.
LI Z H, WANG Z S, HU Q L, *et al.* Design and stiffness analysis of tracking platform for lunar EUV camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11): 2535-2541. (in Chinese)
- [5] 何玲平,陈波,张宏吉,等.极紫外波段空间相机的辐射定标[J].光学精密工程,2016,24(5):1036-1041.
HE L P, CHEN B, ZHANG H J, *et al.* Radiation calibration of EUV space cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1036-1041. (in Chinese)
- [6] 王智.月基二维转台轴承预紧力和系统刚度计算[J].吉林大学学报:工学版,2015,45(6):1831-1835.
WANG Z. Computation of the relationship between bearing preload of lunar-based two-dimensional turntable and system stiffness [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2015, 45(6): 1831-1835. (in Chinese)
- [7] 尼启良,刘世界,陈波.小型高精度软 X 射线-极紫外反射率计[J].光学精密工程,2008,16(10):1886-1890.
NI Q L, LIU S J, CHEN B. Compact high-precision soft X-ray and extreme ultraviolet reflectometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1886-1890. (in Chinese)
- [8] 尼启良,何玲平,刘世界,等.使用感应电荷位敏阳极的极紫外单光子计数成像系统[J].光学精密工程,2010,18(12):2543-2548.
NI Q L, HE L P, LIU S J, *et al.* Extreme ultraviolet single photon-counting imaging system based on induced charge position-sensitive anode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2543-2548. (in Chinese)
- [9] 王永成.极紫外相机电控单元检测系统的设计与实现[J].液晶与显示,2015,30(2):275-282.
WANG Y C. Design and implement of test system for extreme ultraviolet camera electronic control unit [J]. *Chi-*

nese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(2): 275-282. (in Chinese)

- [10] 王永成,王金玲,宋克非.月基极紫外相机图像采集与实时显示系统[J].液晶与显示,2013,28(3):435-439.

WANG Y C, WANG J L, SONG K F. Image acquisition and display system for lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 435-439. (in Chinese)

作者简介:于涛(1980—),男,吉林长春人,硕士,副研究员,硕士生导师,2004年于吉林大学获得学士学位,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器嵌入式系统方面的研究。E-mail:yut@ciomp.ac.cn